



隣接する二指への交互刺激による 牽引力錯覚の順応抑制手法の開発

伊藤天翔¹⁾, 田辺健²⁾, 家永直人³⁾, 黒田嘉宏³⁾

Takato ITO, Takeshi TANABE, Naoto IENAGA, and Yoshihiro KURODA

1) 筑波大学 理工情報生命学術院 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

2) 産業技術総合研究所 人間社会拡張研究部門 (〒 277-0882 千葉県柏市柏の葉 6 丁目 2 番 3 東京大学柏 II キャンパス)

3) 筑波大学 システム情報系 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

概要: 非対称振動により力覚を生起可能な牽引力錯覚は、歩行者の経路誘導や動作教示への活用が期待されている。しかし、順応により牽引力錯覚の知覚が低下するため、長時間の安定提示に課題が残る。本研究では、隣接する二指へ交互に非対称振動を提示することで、順応を抑制しつつ持続的に一方向へ牽引される感覚を生起する手法を提案する。本発表では持続的な錯覚提示時の順応と比較し、手法の有効性を確認した結果について報告する。

キーワード: 牽引力錯覚, 順応抑制, 空間分布

1. はじめに

非対称な勾配で変化する加速度を指腹に入力することで、一方向に牽引されるような錯覚を生起可能である [1]。この牽引力錯覚は、例えばナビゲーションシステムなどの歩行者誘導 [2] や視覚障がい者の安全な歩行をサポートする白杖の正しい振り方を教示する [3] 等、動作教示への活用が期待されている。しかし、牽引力錯覚は持続的に生起させることで順応が起こり、時間とともに錯覚の知覚が低下することが知られている [4]。こうした順応により、牽引力錯覚を用いたシステムは長時間の利用や持続的な錯覚の提示時においては生起される感覚が低減し、設計者が意図した反応が得られなくなる課題がある。牽引力錯覚への順応を低減する手法として、提示する振動刺激を時分割的に変化させ、非対称振動刺激の提示と非提示や力覚ベクトルの向きを周期的に切り替える手法が考えられる。しかし、こうした手法では生起される牽引力錯覚の感覚が断続的になるなど、持続的に非対称振動を提示した際の感覚から変化する恐れがある。そのため、持続的に錯覚を生起させる際の感覚を維持しながら順応を抑制する手法の開発が求められる。本研究では人差し指と中指の隣接した二指の指腹に対し、非対称振動刺激を交互に提示することで、それぞれの指先では時分割的に刺激の有無を変化させ牽引力錯覚への順応を抑制し、手全体では持続的に一方向へ牽引される感覚を生起させる手法を提案する。また、二指に対し交互に刺激を行う周期によって、順応抑制の効果や生起される牽引力錯覚の強度や持続感は変化すると考えられる。本稿では、持続的に非対称振動を提示した際の牽引力錯覚への順応と、提案手法である非対称振動刺激を二指に対し、交互に切り替えながら提示した際の順応を比較する、手法の有効性を確

認する事前実験を行った結果について報告する。また、二指に対する交互提示の切替周期が、牽引力錯覚への順応や感覚の持続性にどのような影響を及ぼすのかについて考察する。本研究により、牽引力錯覚を長時間安定して生起させる手法の基礎的な知見を得られると考えられ、将来的には既存の牽引力錯覚を用いたシステムへの適応が期待される。

2. 関連研究

勾配がなだらかな加速度より、急勾配の加速度を強く知覚するという人間の知覚特性を利用し、雨宮ら [1] は、周期的な並進運動において非対称な加速度を生成することで、仮想的な一方向力ベクトル、すなわち牽引力錯覚を提示する手法を提案した。これに対し、田辺ら [4] は一般的なボイスコイルモータを用いて、位相差を適切に設けた基本波と第二高調波の合成により生成した非対称加速度振動を提示することで、牽引力錯覚を生起させる手法を提案した。本研究では、この知見を基に作成された非対称加速度振動を用いて牽引力錯覚を提示する。また、牽引力錯覚への順応について、田辺ら [5] の研究により、40 秒から 50 秒程度連続して振動を提示すると、牽引力錯覚の知覚が困難になることが報告されている。そこで、本研究では連続して刺激提示を行う時間を 60 秒と設定し、提示中の牽引力錯覚の知覚の強度についての回答をリアルタイムで得ることにより、錯覚への順応抑制効果を評価する。また、本研究で提案する手法では二指の指腹に対して交互に振動刺激を提示するが、提示を切り替える周期によって、順応抑制の効果や生起される牽引力錯覚の感覚等に変化があると考えられる。しかし、この提示切替の周期について適切な指標はまだ明らかではない。そこで、田辺らの報告 [5] から、牽引力錯覚の知

覚に必要な最低刺激提示時間は 66.7 ms であり、十分な牽引力錯覚の知覚には、非対称振動の 6 周期分提示すれば良いという知見に基づき、二指に対し同時に牽引力錯覚を提示し、持続的に錯覚提示を行う提示と、提示切替の周期を非対称振動波形の 6 周期分、12 周期分、18 周期分に設定した、二指に対し交互に刺激提示を行う 3 通りの提示を行い、それぞれについて順応抑制の効果と生起される牽引力錯覚の持続感について評価する。

3. 提案手法

本研究では図 1 のように、人差し指と中指の隣接する二指に対し、非対称振動を交互に提示することで、牽引力錯覚への順応を抑制し、かつ持続的に牽引力錯覚を提示する手法を提案する。デバイスは PC から再生される振動波形ファイルを増幅するアンプと、人差し指と中指への非対称振動刺激の提示により牽引力錯覚を生起させるバイブレーションアクチュエータ (FOSTER 製 型番: 639897) 2 つを連結させたもので構成され、アクチュエータの固定部や把持部については 3D プリンタ (JAPAN 3D PRINTER 製 Raise3D Pro2 Plus) で製作した (図 2)。

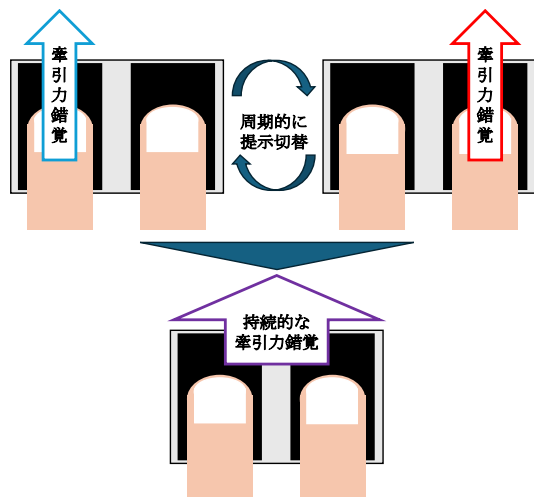


図 1: 提案手法の概念図

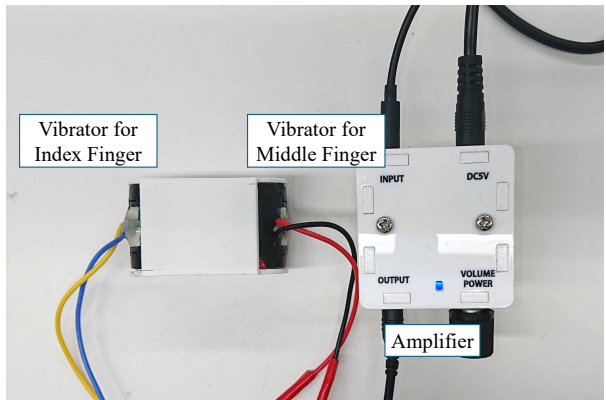


図 2: 牽引力錯覚提示デバイス

4. 事前実験

4.1 実験概要

図 3 に実験のフローチャートを示す。提示する刺激パターンとしては、二指に対し同時かつ持続的に非対称振動を提示するパターン (パターン 1) と、本研究により提案する手法である、非対称振動の提示を二指の指腹部に対し、提示切替の周期を非対称振動の 6 周期分 (パターン 2)、12 周期分 (パターン 3)、18 周期分 (パターン 4) の 3 通りである。各刺激提示の開始前に、牽引力錯覚への順応が起こっていないかを確認する。具体的には、前後方向のどちらかに牽引力錯覚を提示し、知覚された方向を回答させるタスクを 10 回行い、その正答率を確認する。それぞれの刺激パターンの提示前に得られた正答率が変化していなければ、提示開始前における順応による影響は無いと考えられる。刺激提示について、1 分間の間持続的に刺激提示を行い、5 秒毎に提示開始時を 100 として現在の牽引力錯覚の知覚強度を Visual Analog Scale (VAS) にて回答させる。また、刺激提示終了後は順応の影響を排するために 10 分間の休憩を挟み、同時に知覚された錯覚の感覚について、内観報告を求める。

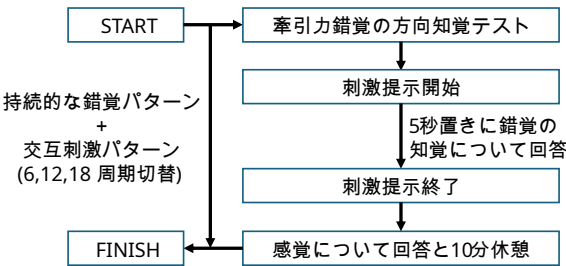


図 3: 実験の流れ

4.2 実験結果

実験参加者は本稿の著者である 24 から 47 歳の成人男性 3 名である。表 1 にそれぞれの実験参加者の回答群を No.1, No.2, No.3 として、各刺激パターン提示前に行われた牽引力錯覚の方向知覚テストの正答率を示す。それぞれの実験参加者で正答率に違いはあるが、各テストにおいて正答率が大きく変わっていないことから、刺激提示開始時には牽引力錯覚への順応は無いものと考えられる。

表 1: 牽引力錯覚の方向知覚テスト

Pattern	Accuracy [%]		
	No.1	No.2	No.3
1	80	70	100
2	80	80	100
3	90	80	100
4	90	70	100

図 4(a)~(c) は各時間ステップ毎の知覚された牽引力錯覚の強度をプロットした散布図であり、各パターン毎の近似曲線を示すグラフである。各提示パターンにおける順応

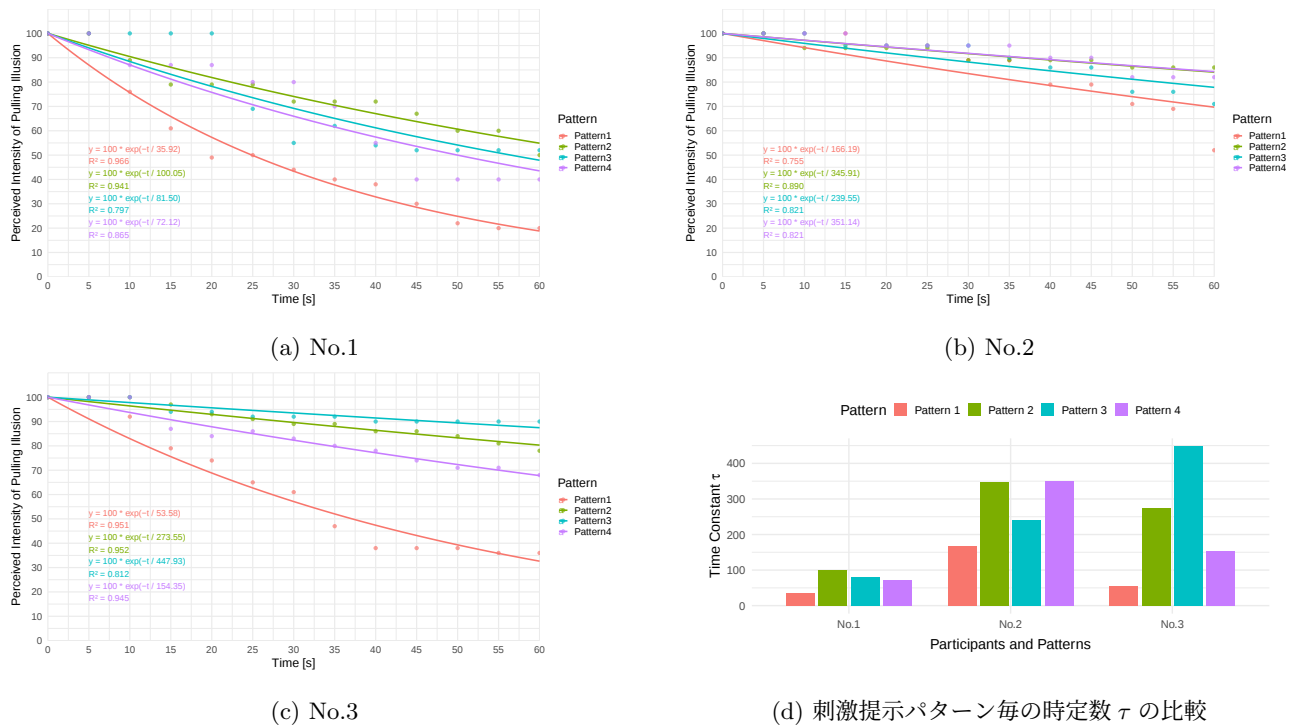


図 4: 各時間ステップにおける牽引力錯覚の知覚強度及び各刺激提示パターンにおける近似曲線

の早さを調べるために、各実験参加者のデータを過渡応答の式 $y = Ae^{-t/\tau}$ に近似した。時定数 τ の値が大きいほど、時間 t の増加に対する錯覚の知覚強度の減少は小さくなるため、牽引力錯覚への順応は遅くなると考えられる。本実験では、回答に際して刺激提示開始時における錯覚の知覚強度を 100 としたため、過渡応答の初期応答 A を 100 に固定し、非線形最小二乗法 (non-linear least squares) を用いて時定数 τ の値を求めた。また、各図に求めた近似曲線の決定係数 R^2 と時定数 τ の値を示す。

4.3 考察

図 4(a)~(c) より、各実験参加者毎における決定係数 R^2 は最低値が 0.755 と、近似曲線の妥当性は十分であると考えられるが、実験参加者全体では 0.5 前後と精度が若干低い。これは、各実験参加者の回答における個人差の影響が大きいためと考えられる。

図 4(d) に各刺激提示パターンにおける実験参加者毎の時定数 τ の値を比較したグラフを示す。図 4(d) より、すべての実験参加者で従来の牽引力錯覚提示であるパターン 1 の時定数 τ の値と比較して、提案手法であるパターン 2, 3, 4 の時定数 τ の値はすべて大きく、牽引力錯覚への順応は緩やかだったと考えられる。そのため、本稿において提案する、二指に対し交互に非対称振動を提示する手法が、牽引力錯覚の順応抑制に有効であることが示唆された。刺激提示の切替周期が異なるパターン 2, 3, 4 の時定数 τ について、各パターン間での傾向は見られなかった。そのため、刺激提示の切替周期の牽引力錯覚への順応抑制への影響は小さいと考えられる。しかし、内観報告として錯覚の持続性に関する回答を求めたところ、切替周期の最も短いパター

ン 2 の提示について、二指に対し同時かつ持続的に非対称振動を提示するパターン 1 の提示により生起される牽引力錯覚の感覚に近い感覚が生起されたという回答や、最も持続的に牽引力錯覚が知覚できたという回答が得られた。それに対し、切替周期の長いパターン 4 では、牽引力錯覚の知覚が難しいという回答が得られた。そのため、刺激提示の切替周期は生起される錯覚の質に影響を及ぼす可能性が考えられる。しかし、本稿における実験は手法の有効性を確認するための事前実験であり、実験参加者についても著者 3 名を対象としたものである。そのため、バイアスの影響やサンプルサイズの不足による個人差の影響などが考えられる。そのため、今後は十分な人数の一般の実験参加者を募集し、今回の事前実験で得られた知見を基に実験の再設計した追加の実験を実施する必要があると考えられる。

5. むすび

本稿では、牽引力錯覚の順応を抑制しつつ持続的に一方へ牽引される感覚を生起する手法として、隣接する二指に対し交互に非対称振動刺激を提示する手法を提案した。また、手法の有効性を確認するための事前実験として、二指に対し同時に、非対称振動を持続的に提示する刺激提示パターンと、二指に対し交互に非対称振動刺激を提示し、その切替周期を調整した 3 通りのパターンにおいて、持続的に刺激を提示した際の牽引力錯覚の知覚強度変化を調査し、各パターンにおける牽引力錯覚への順応速度を評価した。実験結果から、本稿で提案する手法により、牽引力錯覚への順応が抑制される可能性が示唆された。また、刺激提示の切替周期が短いほど順応抑制の効果が高く、感覚の質という

点でも優れている可能性が示唆された。本稿で報告するのは事前実験であり、実験参加者についても本稿の著者を対象としたものである。そのため、バイアスの影響やサンプルサイズの不足などが考えられるが、本稿で得られた知見は今後実施する実験設計に有用な指針となると期待される。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP24K02969, JP24K22316 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 雨宮 智浩, 安藤 英由樹, 前田 太郎. : ”知覚の非線形性を利用した非接地型力覚惹起手法の提案と評価”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 11, no. 1, pp. 47–58, 2006.
- [2] T. Amemiya, H. Gomi. : ”Active Manual Movement Improves Directional Perception of Illusory Force”, IEEE Transactions on Haptics, Vol. 9, Issue. 4, pp. 465–473, 2016.
- [3] T. Tanabe, Y. Fujimoto, K. Nunokawa, K. Doi and S. Ino. : ”White Cane-Type Holdable Device Using Illusory Pulling Cues for Orientation and Mobility Training”, IEEE Access, vol. 11, pp. 28706-28714, 2023.
- [4] T. Tanabe, H. Yano, H. Endo, S. Ino, H. Iwata. : ”Pulling Illusion Based on the Phase Difference of the Frequency Components of Asymmetric Vibrations”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 26, Issue. 1, pp. 203–213, 2021.
- [5] T. Tanabe, H. Yano and H. Iwata. : ”Evaluation of the Perceptual Characteristics of a Force Induced by Asymmetric Vibrations”, IEEE Transactions on Haptics, vol. 11, no. 2, pp. 220-231, 2018.